

光赤天連シンポ  
2008/8/21

# 系外惑星大気： 居住可能性から生命へ

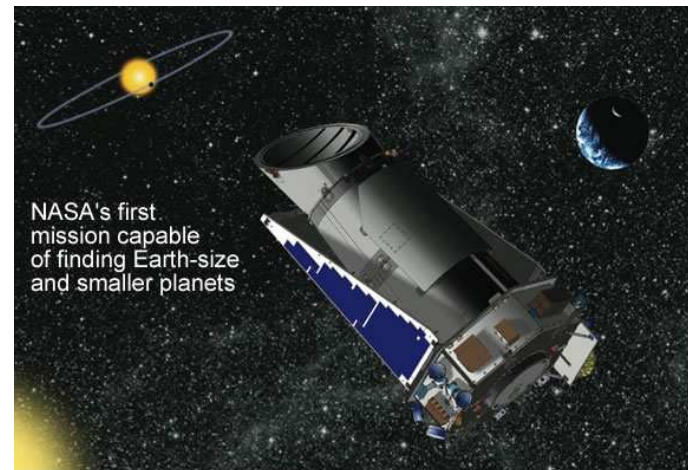
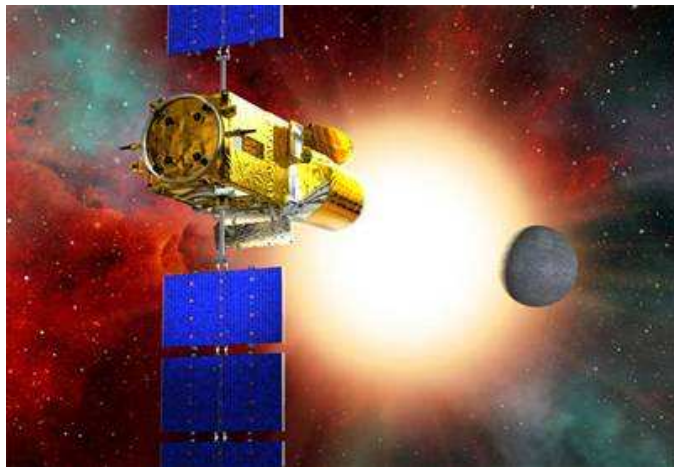
広島大学・宇宙科学センター  
山下卓也

# 概要

- 系外惑星大気の研究
  - トランジット惑星の透過スペクトル
  - 遠くの(軌道長半径が大きい)惑星でも分光できる
- 生命の痕跡の発見の前に、居住可能性の研究も必要
  - 地球(太陽系惑星)をサンプルに考察
- 本当に観測できるのか？(ダイナミックレンジ)
  - 晩期M型星の系外惑星なら??
- どんな観測装置が必要か？
  - (専用)衛星？TMT高分散？

# 系外惑星研究の現状

- 視線速度法による惑星サーベイ・研究
  - 発見数: ~300
  - 統計的性質: 金属量、軌道パラメーター、質量
  - 海王星質量惑星~スーパーアース
- トランジット
  - 現状で発見されているのはホットジュピターのみ
  - 軌道半径の大きい、小サイズの惑星は専用サーベイ衛星 (CoRoT, Kepler) に期待



# 系外惑星研究の現状

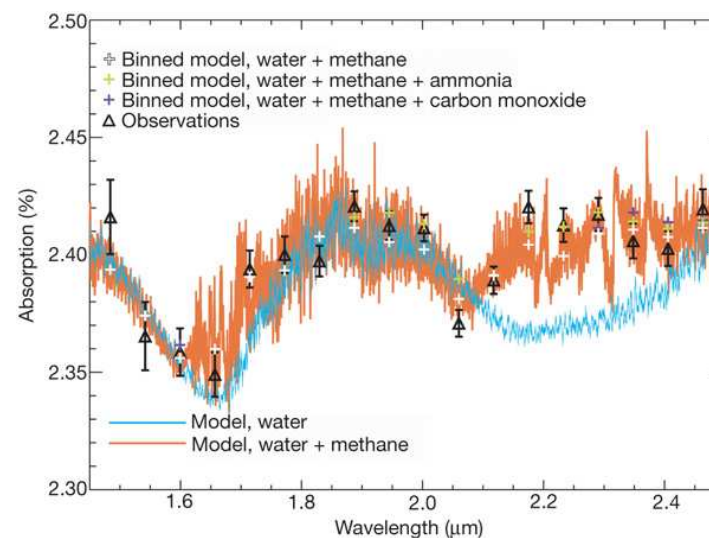
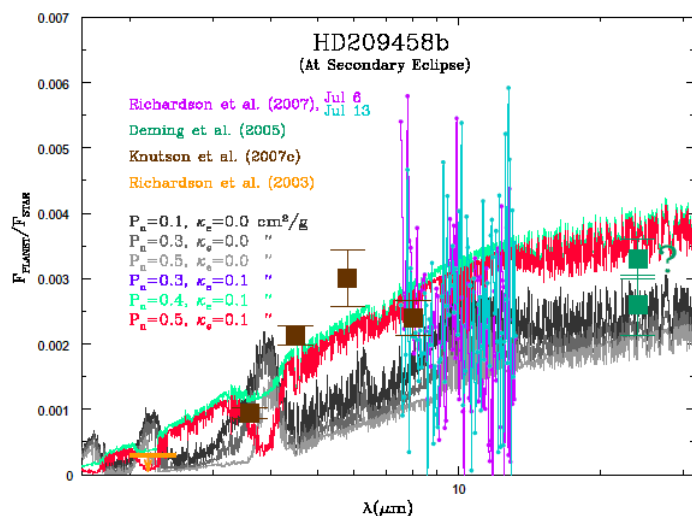
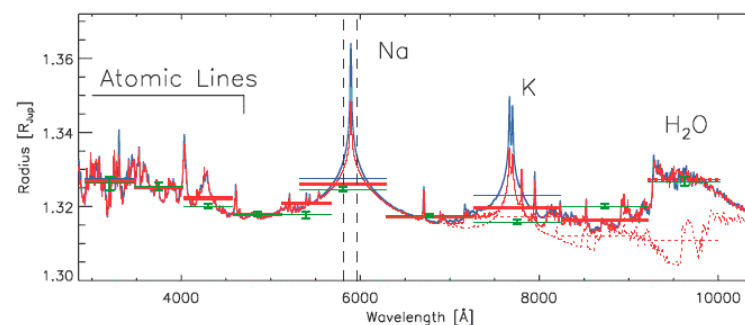
- トランジット現象を利用したホットジュピターの分光観測

- トランジット時の透過スペクトル

- 下層大気: Na
- 上層流出大気: Ly  $\alpha$ 、OI, CII
- 水蒸気、メタン

- 2次食時の放射スペクトル

- 分光観測には成功していない



# これからの系外惑星研究の方向

- 地球型惑星の発見に向けて
  - 視線速度
    - 質量の小さいM型星を狙う
      - 赤外高分散分光器が有利？
  - トランジット
    - 専用衛星によるサーベイ
      - CoRoT, Kepler, TESS
    - サイズの小さいM型星を狙う
      - 専用地上望遠鏡: MEarth (30cm × 10台で個別天体狙い)

# これからの系外惑星研究の方向

- 惑星大気分光

- 透過スペクトルであれば、軌道半径の大きい惑星でも分光できる

- ただし、地球型惑星は大気層が薄い

- 半径の小さいM型星の惑星なら有利

- M0 0.51 Mo 0.60 Ro

- M2 0.40 Mo 0.50 Ro

- M5 0.21 Mo 0.27 Ro

- M8 0.06 Mo 0.10 Ro

- 放射スペクトルでも、主星のサイズが小さいと有利

- HZの固体惑星の大気の研究について放射スペクトルと透過スペクトルとどちらが有利かは要検討

- 今回は透過スペクトルの場合の検討

# 系外固体惑星大気の研究

- 大目的:「**生命の存在の証拠を見つける**」
  - 数は限られているかもしれない
- その前(同時)に「**固体惑星の居住可能性を検討**」
  - 水の存在以外に生命の発生・継続に有利な条件？
  - 太陽系惑星についての研究をベースに考察
  - 晩期型M型惑星のHZ の固体惑星を分光観測するにはどの程度の能力が必要か？

# 地球大気の進化

- 一次大気の(獲得と)散逸
  - H/He 大気の散逸
  - マグマオーシャン期の散逸?
    - 惑星形成の最終段階と原始惑星系星雲の散逸の前後関係
    - 原始惑星系星雲散逸前に岩石惑星の形成の最終段階が終わっても、時間はかかるが失われるだろう
- 二次大気の獲得
  - 地球内部から? 隕石が供給?
  - 組成
    - 46億年前: 太陽光度は30%暗く、徐々に増光
      - 20億年前まで平衡表面温度が氷点以下
    - しかし、44億年前には液体の水はあった(ジルコン結晶)
      - 温暖化ガス(CO<sub>2</sub>など)が大量にあった



# 地球大気の進化

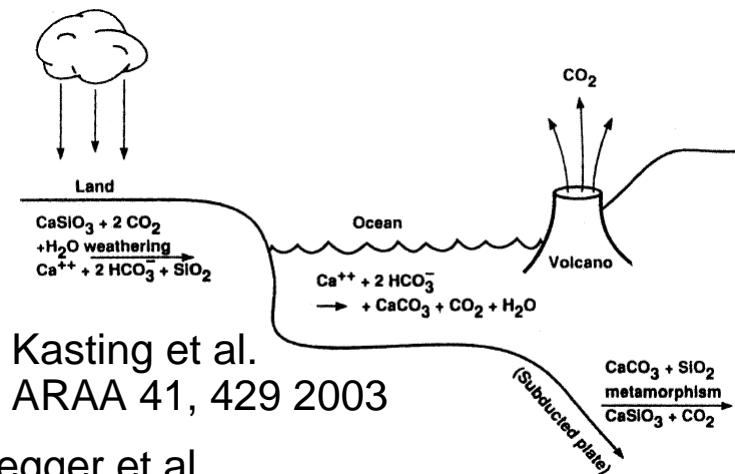
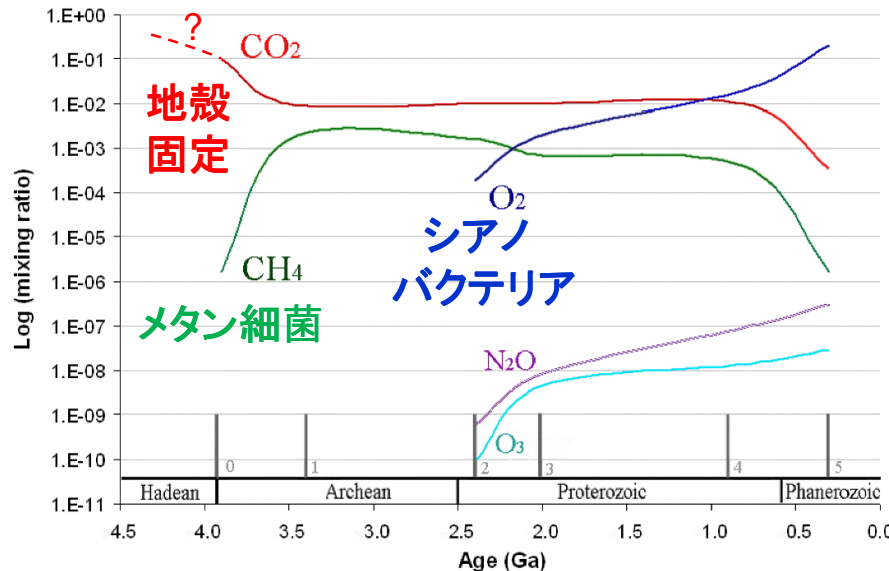
- 二次大気の進化(生命現象を除く)

- CO<sub>2</sub> の地殻への固定

- 海洋に溶解したCO<sub>2</sub> がCa と結合 → CaCO<sub>3</sub>
    - 海洋の存在、地表の存在(降雨によるCaの溶解)
    - 次の炭酸塩-珪酸塩サイクルともリンク

- 炭酸塩-珪酸塩サイクル

- 安定な気候に必須
    - 海と陸の存在、火山活動の存在を示唆する

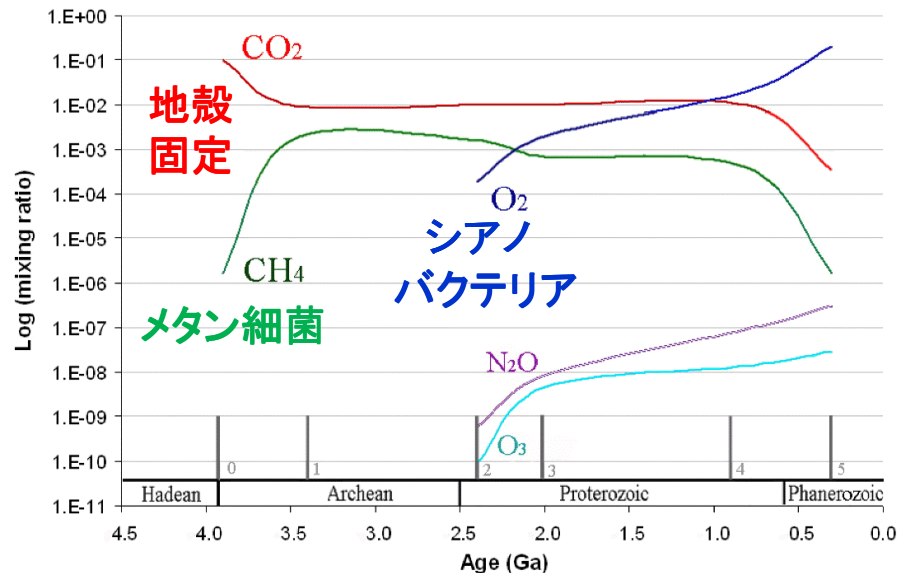


Kasting et al.  
ARAA 41, 429 2003

Kaltenegger et al.  
ApJ 658, 598 2007

# 地球大気の進化

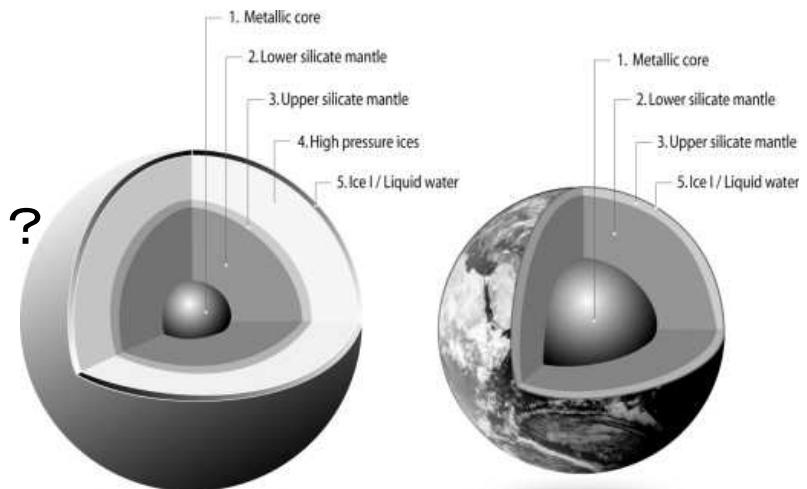
- 生命による大気組成の変化
  - メタン細菌によるメタンの生成
  - シアノバクテリアによる酸素の生成
  - 酸素分子を材料としてオゾン層の形成
    - 紫外線のブロック
    - 生命が地上へ



Lisa Kaltenecker et al.  
ApJ 658, 598 2007

# 海洋惑星

- 氷惑星がハビタブルゾーンに移動してきたら？
- (地球型惑星に大量の水が供給されたら?)
  - 氷層の上部が深い海洋で覆われた惑星となる
  - 海洋惑星の生命の可能性は？
    - もちろんあるだろう
    - 高等生物には進化できないかも？
  - 居住可能条件は？
    - 陸地がないので、珪酸塩-炭酸塩サイクルは働かないであろう
      - 温度(変動)への制限が厳しい？
    - まだまだ考察が必要



C. Sotin et al.  
Icarus 191, 337 2007

Ocean Planet

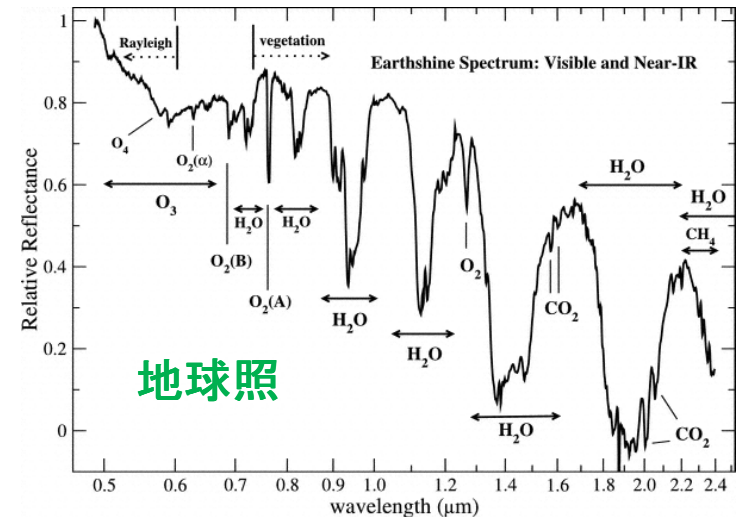
Earth-like planet

# 系外固体惑星大気

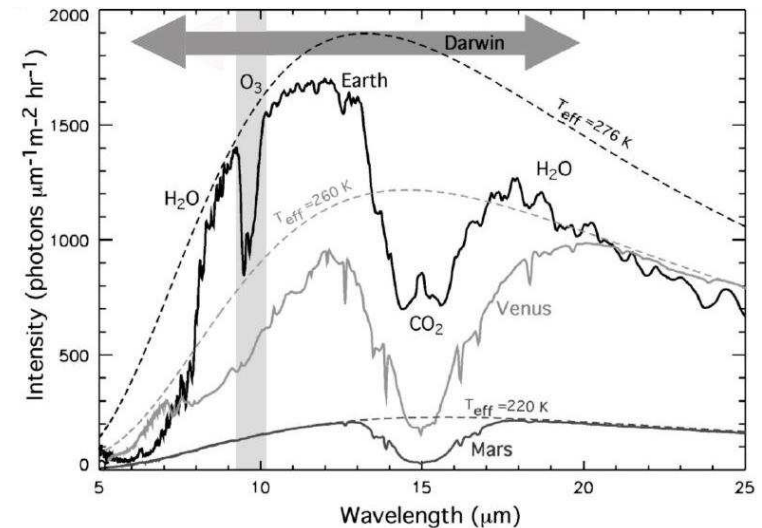
- 地球類似惑星の特徴 = 居住可能性の(必要)条件？
  - 液体の水の存在 → 大量の水蒸気(+温度)
  - 大気存在・特徴(酸化的？還元的？)
    - 炭素元素の主要存在形態は  $\text{CO}_2$  (酸化的環境では)
      - 地球のメタンは生物由来
    - 着目点:メタン、 $\text{CO}_2$  の存在量比 ( $\text{NH}_3$  の存在量)
      - 大気は酸化的(2次大気、H原子の流出) or 還元的(一次大気)
      - “ $\text{CO}_2$  の固定“ はわかりづらい？
  - 炭酸塩—珪酸塩サイクル
    - 温暖化ガス量の調節により温度を一定に保つ
      - 例えば、主星の光度変化に対して
    - 必要条件:“海、陸地、火山活動“の存在
    - 着目点:炭酸塩—珪酸塩サイクルは働いているか？
      - 平衡温度(主星の光度、軌道半径)と実際の表面温度、温暖化ガスの関連

# 系外固体惑星大気

- どのバンドを狙うか
  - CO<sub>2</sub>: 1.06 μm (弱い), 4.7 μm, 15 μm (強くて幅広い)
  - CH<sub>4</sub>: 0.88 μm, 1.66 μm, 3.3 μm, 7.66 μm
  - H<sub>2</sub>O: NIR-MIRの多くの波長帯
  - O<sub>2</sub>: 0.76 μm
  - O<sub>3</sub>: 0.45 - 0.74 μm、9.6 μm
- 必要な波長帯
  - 中間赤外線が重要(強いO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>)
  - 近赤外線にも同様に重要なフィーチャーあり(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
  - オゾンだけでなく、酸素も狙うなら可視光も必要



Turnbull et al.2006 ApJ644, 551



Darwin 計画書

# 系外固体惑星大気

- 透過スペクトルにおける惑星大気吸収の深さ

- 吸収面積 = 大気層の厚さ × 惑星外周長

- 大気層の厚さ

- スケールハイト  $H = kT / mg = kT / Gm \rho R$

- 大気層の厚さ ~  $H \times \text{several} ?$

- » 雲にも依存

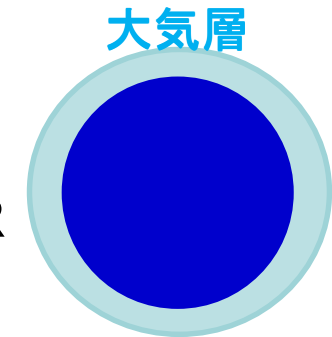
- 惑星半径に依存

- » 惑星半径: 大 → 重力: 大 →  $H$ : 小 → 大気層: 薄い

- 面積  $S = 2\pi R H = 2\pi kT / m \rho$  (結局、あまり半径に依存しない)

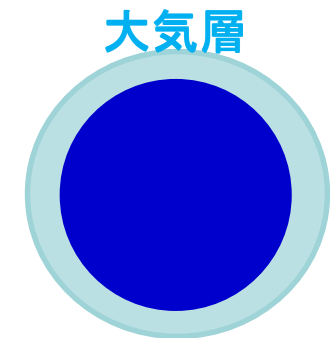
- 主に惑星密度に依存 (海洋惑星は有利)

- 質量の大きい岩石惑星は少し不利



# 系外固体惑星大気

- 透過スペクトルにおける惑星大気吸収の深さ
  - 惑星の大気の総量にも依存
    - この点では、大きい岩石惑星 (**Super Earth**) がたぶん有利
    - 表面気圧 地球: 1 atm, 金星: 90 atm (90% がCO<sub>2</sub>)
      - 惑星の大気史にも依存
  - 軽い惑星は大気を保持できない
    - 火星 (M=0.1ME) : 0.006 atm
  - 吸収深さ = 大気吸収面積と主星ディスクとの面積比
    - 主星は小さいほどよい → 晩期M型星がベスト
    - M5型:  $1-2 \times 10^{-5}$  (地球型惑星)、  
 $2-4 \times 10^{-5}$  (海洋惑星)
    - M8型:  $0.8-1.5 \times 10^{-4}$  (地球型惑星)、  
 $2-3 \times 10^{-4}$  (海洋惑星)
  - ダイナミックレンジは $10^4$ 程度で良いかも



# 系外固体惑星大気

- 感度
  - 吸収量 = 主星の面輝度 × 吸収面積
    - 主星の面輝度は質量が大きいほど大きい、星のサイズも大きくなり吸収深さが浅くなりデメリットの方が大きい
    - 透過スペクトルの場合、惑星の軌道半径は関係しない
  - 惑星系までの距離  $d < 33\text{pc}$  (MEarth サーベイ)
- 例えば、
  - $d=10\text{pc}$ , M5V型星に  $R=1R_E$  のトランジット惑星
    - $V=12.3\text{ mag}$ ,  $K=6.1\text{ mag}$ ,  $1.6 \times 10^{-5}$  の大気吸収
    - $\Delta V=25.3\text{ mag}$ ,  $\Delta K = 19.1\text{ mag} \sim 15\ \mu\text{Jy at K}, 1\ \mu\text{Jy at } 10\ \mu\text{m}$
  - $d=10\text{pc}$ , M8V型星に  $R=1R_E$  のトランジット惑星
    - 星のパラメーターがない！
    - しかし、上記パラメータの吸収量とほぼ同じ



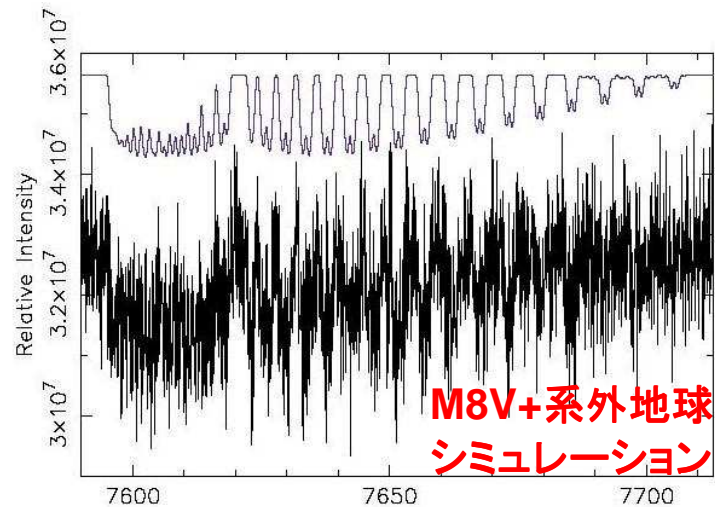
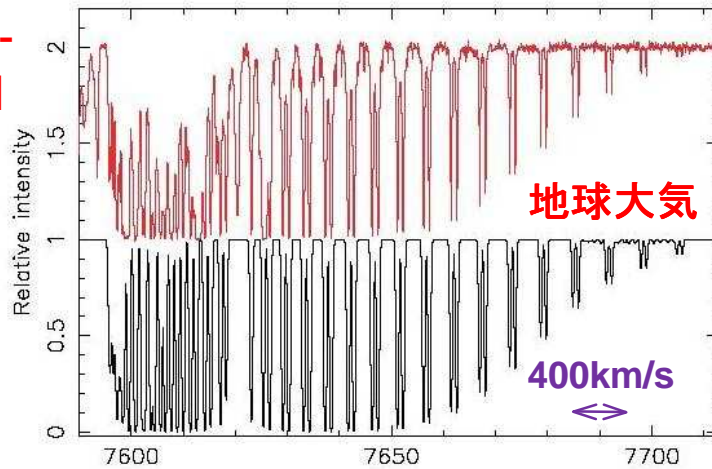
# 観測装置

- 可視光・近赤外線
  - TMT高分散

- 地球大気成分と同じ分子を狙うので、線幅以上の速度差が必要
  - O<sub>2</sub> A band は難しいか？ 衛星が必要？
  - CO<sub>2</sub> (1.06  $\mu$ m 弱い), CH<sub>4</sub> (at 1.66  $\mu$ m) は？

- 高分散分光で惑星大気吸収線を地球大気吸収線と分離しないと、地球大気吸収の変動によりダイナミックレンジが稼げない

O<sub>2</sub> A-band



R ~ 400000

Webb et al. 2001 PASA 18,  
252

# 観測装置

- 可視光・近赤外線
  - 衛星では低分散分光 ( $R \sim 100$ ) がよい
    - JWST NIRCam:  $R=500$  at NIR
- 中間赤外線
  - 衛星が必須
  - 低分散分光 ( $R \sim 20$ ) がよい
    - SPICA 中間赤外装置  $R=3000$  at  $5 \sim 40 \mu\text{m}$  分解能が高すぎる
    - コロナグラフ  $R=200$  at  $5 \sim 28 \mu\text{m}$  スリットレス分光ができる？
    - JWST MIRI:  $R=100$  at  $6\text{-}30 \mu\text{m}$
- 惑星の表面温度も必要 (炭酸塩－珪酸塩サイクルの検証には)
  - 2ry Eclipse 時の惑星放射 at  $\sim 300\text{K}$
  - 中間赤外線高精度測光観測

# 観測装置

- 専用衛星
  - 波長域: 可視光～中間赤外線同時分光(スリットレス)
  - 波長分解能
    - 可視光:  $R=150$  ( $O_2$ )
      - 重要なのは  $\lambda = 0.76 \mu m$  だけなので、NIR検出器でもOK?
    - 近赤外線:  $R=100$  ( $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ )
    - 中間赤外線:  $R=20$  ( $CH_4$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ )
  - 口径?
    - 感度評価はまだ
- SPICA の観測装置にスリットレス低波長分解能のモードを追加できるか？

# 観測装置

- (海外の)計画
  - JWST
    - NIRSpec:  $R \sim 1000$  at  $1-5 \mu\text{m}$ 
      - e.g., 広い $\text{H}_2\text{O}$  + 狭い $\text{CO}_2$  (海洋惑星 for M3V J=8mag)
    - MIRI:  $R=100$  at  $5-14 \mu\text{m}$  スリットレスプリズム
      - Hot Jupiter の分光
      - Warm Super-Earth (at HZ for M型星)の測光
  - SPICA(現在のところ)
    - 中間赤外線観測装置  $R = 3000$ (& 30000) at  $5-40 \mu\text{m}$ 
      - 詳細な分子分光狙い
    - コロナグラフ  $R=200$  at  $5-28 \mu\text{m}$ 
      - 惑星を分離して分光狙い

# 観測装置

- (海外の)計画
  - Tracer (Transit Characterization Explorer)
    - 0.6m 主鏡、 $R=50$ , 2チャンネル分光器、 $0.8-1.7 \mu m$
  - THESIS (Terrestrial and Habitable-zone Exoplanet Spectroscopy Infrared Spacecraft)
    - 1.5m 主鏡、 $R=500$ ,  $2-15 \mu m$
    - ダイナミックレンジ  $10^5:1$

# まとめ

- 系外惑星大気の研究
  - トランジット惑星の透過スペクトル分光で、M型星のハビタブルゾーンにある固体惑星の大気を研究しよう
- 生命の痕跡の発見と共に居住可能性の研究にも目を向けよう
- 晩期M型星の固体惑星なら観測可能性はある
  - もっとも楽観的な場合のダイナミックレンジは  $10^4 : 1$
  - $10^5 : 1$  なら現実的？
  - 感度評価はまだ不十分
    - どのようなトランジット惑星が発見されるかに大きく依存
- TMT高分散での酸素の分光観測は難しいか？
- SPICA, JWST, 専用衛星？

(質疑応答 — Q:質問, A:回答, C:コメント — 氏名無しは発表者の発言, 敬称略)

(Q) 何故スリットレス分光なのか? (中川)

(A) 宇宙では大気がないために、システム効率の変化は無視できるかも知れないが、参照星のスペクトルを同時に取得して比較することにより、大きなダイナミックレンジを達成する(わずかな変動を捉える)ことが目的である。また、フィーチャーの変化だけではなく、フラックスの変化も測定できることが望ましい。そのためには、ポインティング変動によるスリット効率の変化の影響を受けないように、スリットなしが良い。

(Q) SPICA などの衛星中心の話だったが、やはり TMT に絡むのは難しいのだろうか? (本原)

(A) 地球大気成分と同じガスを検出しないといけないので、地上からの観測は容易ではない。系外惑星の視線速度が地球大気に対して分光器の波長分解能より十分に大きくずれている必要がある。波長分解能をどれだけ上げられるか、どれだけ視線速度のずれた系外惑星が見つかるかなどに依存する。これに加えて、酸素は2本の吸収線がわずかな波長差のペアになっているので、さらに困難さが増している。不可能ではないかも知れないが、かなり難しいことは確かである。実現可能性を判断するには、より具体的で詳細な検討が必要。

(C) SPICA のコロナグラフ観測装置に低分散分光機能を持たせるについては考えていることがあるので、後ほど詳しく話しましょう。(塩谷)